

В. Н. Костин, О. Н. Василенко, Д. Ю. Филатенков, Ю. А. Чекакина, Е. Д. Сербин
Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург

МАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Исследован комплекс магнитных и магнитоакустических свойств холоднодеформированных и отожженных при различных температурах сталей с содержанием углерода 0,2 % (сталь 20Г) и 0,7 % (сталь 70Г). Установлено, что при увеличении температуры отжига этих сталей вплоть до 700 °С монотонно растут значения параметров, связанных с интенсивностью необратимых процессов перемагничивания. Показано, что коэрцитивная сила стали 70Г при вариации отжига меняется немонотонно и не может быть параметром контроля. Из числа квазистатически измеряемых магнитных параметров для контроля отжига могут быть использованы остаточная индукция и индукция коэрцитивного возврата. Исследована структурная чувствительность таких параметров магнитоакустической эмиссии (МАЭ), как амплитуда, основная частота, поле максимума МАЭ. Показано, что амплитуда и поле максимума МАЭ коррелируют с остаточной магнитной индукцией вещества исследованных сталей и могут быть использованы при диагностике.

Ключевые слова: сталь, пластическая деформация, отжиг, магнитные свойства, индукция коэрцитивного возврата, магнитоакустическая эмиссия, амплитуда, основная частота.

V. N. Kostin, O. N. Vasilenko, D. Yu. Filatenkov, Yu. A. Chekasina, E. D. Serbin

MAGNETIC PARAMETERS OF CONTROL OF STRESS-STRAINED STATE CARBON STEELS

The complex of magnetic and magnetoacoustic properties of cold and annealed at different temperatures steels with a carbon content of 0.2% (steel 20G) and 0.7% (steel 70G) has been researched. It was found that with increasing annealing temperature of these steels up to 700 °C monotonically increasing values associated with the intensity of irreversible processes of magnetization reversal. It is shown that the coercive force of 70G steel by varying the annealing changes nonmonotonically and can not be a parameter control. Among quasistatically measured magnetic parameters to control the annealing can be used residual induction and the induction of the coercive return. The structural sensitivity of such parameters of the magnetoacoustic emission (MAE) as amplitude, base frequency, maximum field of MAE has been researched. The amplitude and the maximum field MAE correlate with remanence substances investigated steels may be used for diagnostics.

Keywords: steel, plastic deformation, annealing, magnetic properties, induction of the coercitive return, magnetoacoustic emission, amplitude, base frequency.

Исследован комплекс магнитных и магнитоакустических свойств холоднодеформированных и отожженных при различных температурах сталей с содержанием углерода 0,2 % (сталь 20Г) и 0,7 % (сталь 70Г).

Задачей настоящей работы было выявление квазистатически и динамически измеряемых структурно-чувствительных магнитных и магнитоакустических параметров, пригодных для диагностики напряженно-деформированного состояния стальных объектов.

Образцы и методики измерений

Для варьирования в широких пределах напряженно-деформированного состояния образцы из сталей 20Г и 70Г были подвергнуты холодной пластической деформации прокаткой до 40 % и 63 %, соответственно, (по изменению сечения), затем отожжены при различных температурах в диапазоне от 20 до 800 °С в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе. Далее образцы шлифовали для снятия окалины и обезуглероженного слоя. Конечные размеры образцов стали 20Г составили 4х10,2х69 мм, а стали 70Г – 6х9,5х88 мм. Твердость образцов измеряли твердомером ТК14-250 с погрешностью не более 0,5 HRB (шкала Бринелля).

Магнитные свойства вещества образцов были измерены с помощью магнитно-измерительного комплекса REMAGRAPH C – 500 производства фирмы Magnet-PhysikDr. SteingroeverGmbH, Германия [1]. Погрешность измерения намагниченности не превышала 3 %, погрешность измерения поля – 2 %.

Измерение параметров магнитоакустической эмиссии проводили при перемагничивании образцов однородным синусоидальным полем. Подробное описание установки и методики измерения МАЭ приведено в работах [2; 3]. Погрешность измерения магнитоакустических параметров не превышала 20 %.

Экспериментальные результаты

Увеличение $T_{отж}$ до 300 °С приводит к слабому росту твердости сталей, обусловленному деформационным старением [4; 5]. Падение твердости при дальнейшем увеличении $T_{отж}$ вызвано возвратом и рекристаллизацией феррита, а для стали 70Г – еще и коагуляцией цементита.

Коэрцитивная сила исследованных материалов уменьшается, начиная уже с $T_{отж} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. У стали 20Г падение H_c продолжается вплоть до $T_{отж} \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$. На зависимости $H_c(T_{отж})$ для стали 70Г имеется локальный максимум при $T_{отж} \sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обусловлено коагуляцией карбидов, когда размер включений становится соизмерим с толщиной междоменной границы [6].

Начальная μ_{in} и максимальная μ_{max} магнитные проницаемости, остаточная магнитная индукция B_r и коэффициент Рэлея b_0 монотонно растут до $T_{отж} \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наибольший рост указанных свойств для стали 20Г приходится на диапазон $(300 \div 600)\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для стали 70Г - на диапазон $(300 \div 700)\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температурах ниже $(450-500)\text{ }^{\circ}\text{C}$ изменение магнитных свойств связано со снятием искажений кристаллической решетки, а также с выходом углерода из решетки пересыщенного α -твердого раствора, а при более высоких температурах – с процессами рекристаллизации [4; 5].

На рис. 1 представлены нисходящие ветви предельных петель гистерезиса образцов из стали 70Г. Углы наклона петли в первом и втором квадрантах растут при повышении $T_{отж}$ до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ также как и остаточная магнитная индукция B_r вещества. Это значит, что параметрами контроля могут быть значения индукции на петле при фиксированной величине магнитного поля H_p или значения магнитного поля при фиксированной величине индукции B_p (см. рис. 1, а). Аналогичная методика была предложена в работе [7] для контроля упругих деформаций и для ее реализации могут быть использованы приборы типа СИМТЕСТ [8; 9].

С целью определения практической возможности применения остаточной магнитной индукции B_r в качестве параметра контроля напряженно-деформированного состояния, а также для оценки возможности применения в тех же целях индукции коэрцитивного возврата B_{Hc} , были выполнены измерения этих величин с помощью аппаратно-программной системы СИМТЕСТ 2.10 [9]. Результаты измерений представлены на рис. 2.

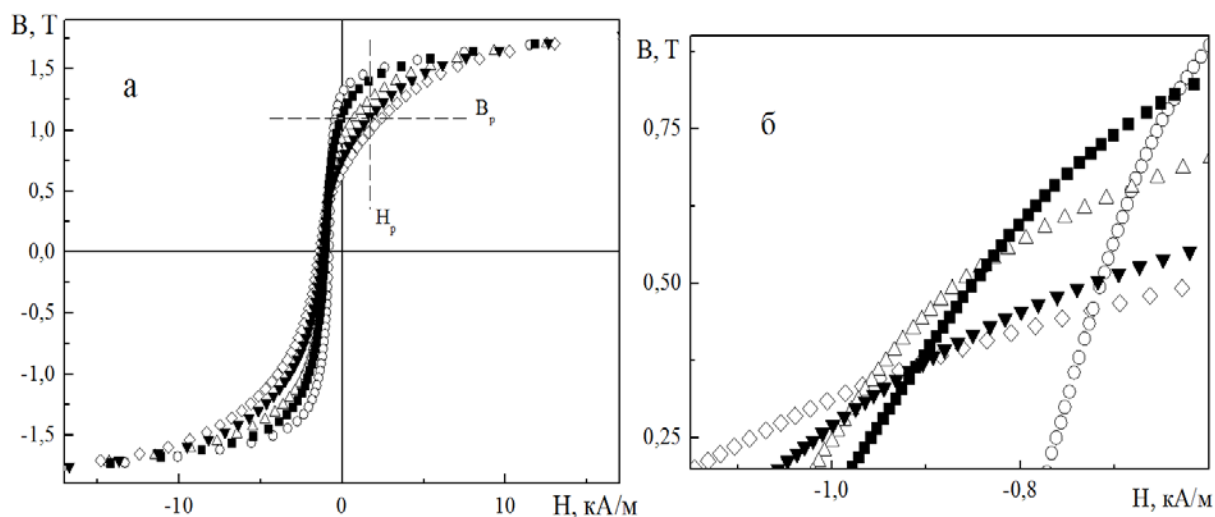


Рис. 1. Нисходящие ветви (а) и выделенные фрагменты (б) предельных петель гистерезиса образцов из холоднодеформированной стали 70Г, отожженных при различных температурах: \diamond 20 °С; \blacktriangledown 300 °С; \blacksquare 600 °С; \circ 700 °С; \triangle 800 °С

Локально измеряемая с помощью приставного П-образного электромагнита величина B_r^* хорошо коррелирует с величиной остаточной магнитной индукции вещества B_r . Кроме того, как видно из рис. 2б, для исследованных сталей величина B_{hc}^* монотонно уменьшается при увеличении $T_{отж}$ до 700 °С, что делает ее пригодной для использования в качестве параметра контроля.

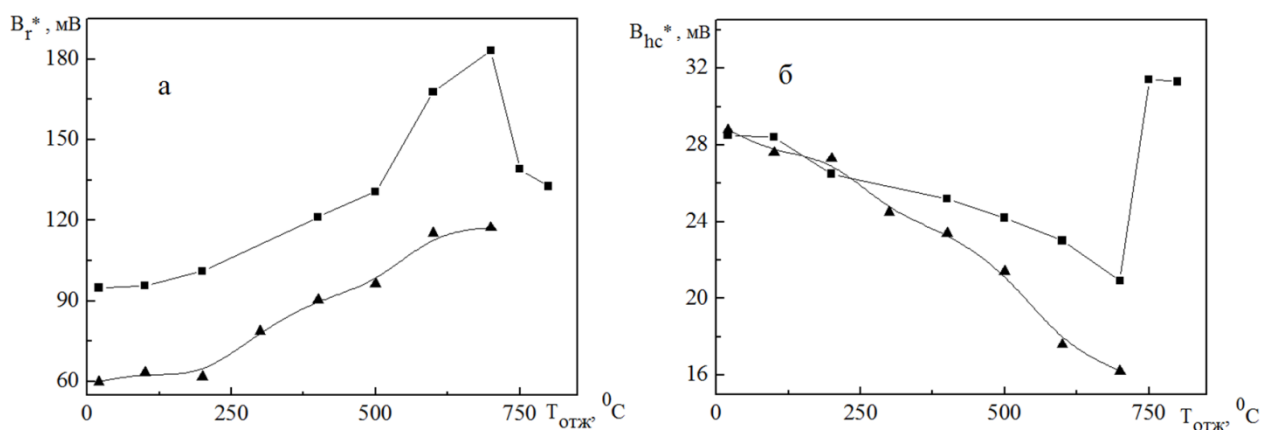


Рис. 2. Измеренные с помощью АПС СИМТЕСТ зависимости относительных величин остаточной магнитной индукции вещества B_r^* (а) и индукции коэрцитивного возврата B_{hc}^* (б) от температуры отжига образцов из сталей 20Г (\blacktriangle) и 70Г (\blacksquare)

На рис. 3 приведены зависимости усредненной амплитуды (размаха) сигнала МАЭ от температуры отжига для образцов из сталей 20Г и 70Г.

Измерения были проведены при частоте перемещающего поля $f_{rm} = 4,5$ Гц. Обращает на себя внимание сходство зависимостей $U_{MAE}(T_{отж})$ и $B_r(T_{отж})$. При увеличении температуры отжига в диапазоне $(20 \div 700)^\circ\text{C}$ величина U_{MAE} сталей 20Г и 70Г возрастает приблизительно в 2 раза, что сопоставимо с изменением остаточной магнитной индукции этих материалов.

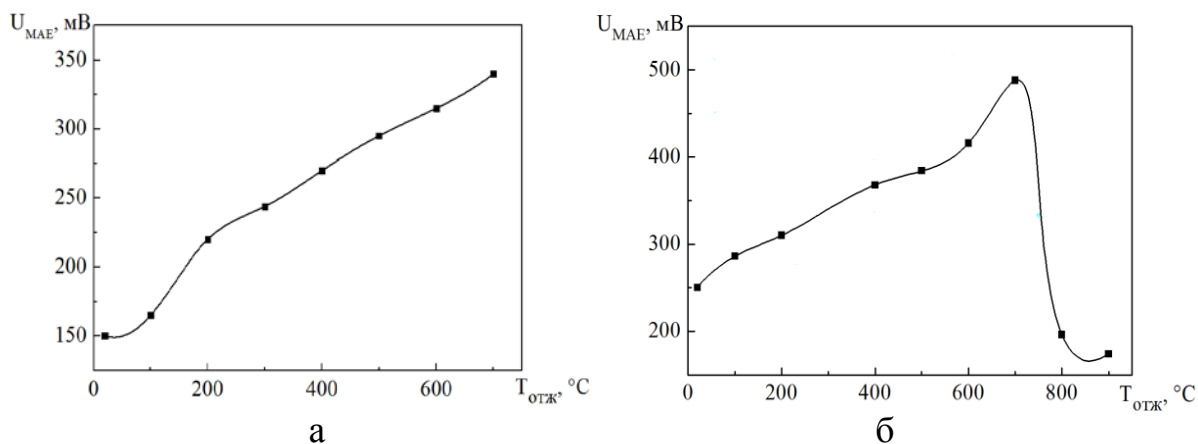


Рис. 4. Зависимость амплитуды сигналов магнитоакустической эмиссии U_{MAE} от температуры отжига сталей 20Г (а) и 70Г (б)

Для магнитной структуроскопии могут быть использованы как амплитудно-частотные характеристики МАЭ, так и сопоставление сигналов МАЭ с гистерезисными магнитными характеристиками материалов. МАЭ в исследованных материалах имеет по два максимума на нисходящей и восходящей ветвях гистерезиса. Наибольший по амплитуде максимум приходится на область полей порядка коэрцитивной силы материалов, а меньший – на область полей приближения к насыщению. Поле “коэрцитивного” максимума МАЭ характеризует магнитные свойства материала. При известной временной зависимости перемещающего поля (в нашем случае, синусоидальной) изменение этого поля может быть определено по временному сдвигу максимумов на осциллограмме.

Заключение

Установлено, что при увеличении температуры отжига холоднодеформированных сталей 20Г и 70Г вплоть до 700°C монотонно растут значения параметров, связанных с интенсивностью необратимых процессов

перемагничивания. Показано, что при возможности контактного квазистатического измерения оптимальными магнитными параметрами контроля напряженно-деформированного состояния обеих сталей могут быть остаточная магнитная индукция вещества B_r или индукция коэрцитивного возврата B_{Hc} .

Показано, что перспективными параметрами структуроскопии холодно-деформированных сталей являются амплитуда и поле максимума магнитоакустической эмиссии.

Работа выполнена по теме «Диагностика» № 01201463329.

Список литературы

1. Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH : официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.magnet-physik.de/1.html?L=1> (дата обращения: 17.11.2015). Загл. с экрана.
2. Амплитудно-частотные характеристики магнитоакустической эмиссии термообработанных сплавов железа / В. Н. Костин [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16, № 5. – С. 103–110.
3. Костин В. Н., Филатенков Д. Ю., Чекапина Ю. А., Василенко О. Н. Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах // Акустический журнал (в печати).
4. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. – М. : Металлургия, 1965. – 431 с.
5. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Механические свойства металлов. – М. : Металлургия, 1979. – 495 с.
6. Вонсовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. – М. ; Л.: ОГИЗ – Гостехиздат, 1948. – 816 с.
7. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов/ В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 54–67.
8. Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии / В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2008. – № 4. – С. 66–77. (Kostin V. N., Osintsev A. A., Stashkov A. N. et al. Portable instruments for multiparameter magnetic evaluation of material structures – Russian journal of nondestructive testing, Volume 44, Issue 4, APR 2008, pp. 280–289, DOI: 10.1134/S1061830908040086).
9. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования / К. В. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 3–11.